

論文内容の要旨

論文題目「高強度短パルスレーザーによる固体界面プラズマからの高次高調波の生成」

氏名 石澤 淳

固体界面プラズマからの高次高調波は、偶・奇数次の高調波生成やレーザー照射強度に比例する変換効率などが理論的に予測され注目されている。また、高輝度かつ波長可変なコヒーレントX線光源として期待されている。

本論文は、固体界面プラズマからの高次高調波発生メカニズムを解明するために、空間分布特性、励起レーザー偏光依存性、変換効率、高調波ブルーシフトの研究を行ったものである。

第1章では、高次高調波発生メカニズムとその研究背景について述べる。

第2章では、本研究で使用した実験装置の説明を行う。

第3章では、固体界面プラズマからの高次高調波空間分布について述べる。励起レーザーは、Chirped Pulse Amplification (CPA) Nd:Glass laser system (パルス幅 2.2 ps)を使用した。その励起レーザーを $3 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15} \text{ Wcm}^{-2}$ の強度でアルミ蒸着ターゲットに照射した。3~5次高調波の divergence は励起レーザーの絞り角とほぼ同程度で発生することが確かめられた。その高調波横モードは励起レーザーの横モードに良く似ていることが明らかになった。3次高調波の2次元空間分布像を図1に示す。励起レーザーの照射強度を 10^{14} Wcm^{-2} から増していくと、指向性良く反射方向に発生していた高調波の divergence は徐々に大きくなる。さらに、 10^{17} Wcm^{-2} の照射強度において、高調波はほぼ等方的に発生していることを角度分布測定により確かめた。次に、高次高調波空間分布のパルス幅依存性について観測を行った。その結果、パルス幅の短い励起レーザーを用いた場合、高調波は指

向性良く発生していることが確認された。これらは、レーリー・テラー不安定性によるリップリングが成長するため、高調波の divergence が増加すると考えられる。また、高調波の divergence は、高調波の次数に反比例するという新たな知見を得ることが出来た。これは、摂動的手法を用いて定性的に説明することができる。

第 4 章では、高次高調波の励起レーザー偏光依存性について述べる。計算機シミュレーション結果は、P 偏光で入射した場合が S 偏光で入射した場合よりも高調波強度が 1 桁以上大きいと予想している。CPA Nd:Glass レーザー (パルス幅 2.2 ps) の励起レーザーを $3 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15} \text{ Wcm}^{-2}$ の強度

で照射した結果、高調波強度は、励起レーザーの偏光が P 偏光 > S 偏光 > 円偏光、の順に強いことが確かめられた。また、P 偏光で入射した場合は S 偏光で入射する場合より、高調波強度は約 2 倍程度であることが明らかになった。さらに、サブピコ秒の励起レーザーを使用した場合、照射強度の増加に伴い、励起レーザー偏光の違いによる高調波強度の差が小さくなることが確かめられた。これは、レーザー生成プラズマ内で発生する自発磁場によるファラデー効果より、レーリー・テラー不安定性による臨界電子密度界面におけるリップリング成長の影響が大きいことによると考えられる。

第 5 章では、固体界面プラズマからの高次高調波の変換効率について述べる。 $6 \times 10^{14} \text{ Wcm}^{-2}$ の強度でシングルパルス励起(パルス幅 2.2 ps)した結果、2 次と 4 次の高調波強度の比 $I_{4\omega}/I_{2\omega}$ は約 0.25 であった。この値は、シミュレーション結果より大きい値である。この結果は、高調波の次数増加に対して変換効率が非常に緩やかに減少していることを意味する。また、パルス幅 2.2 ps の励起レーザーの照射強度を 6×10^{14} から $1 \times 10^{17} \text{ Wcm}^{-2}$ まで上げたとき、3 次高調波の変換効率は約 4×10^2 倍、4 次高調波は約 7×10^2 倍、5 次高調波は約 6×10^3 倍と増加することが分かった。異なるパルス幅 2.2 ps と 100 ps の励起レーザーを使用した場合、高調波の変換効率はパルス幅 2.2 ps の方が良いことが分かった。これはパルス幅の短い方がプレプラズマの生成が少なく、より急峻な電子密度勾配が形成され、自由電子運動の非線形性が高くなるからであると考えられる。この実験結果は数値計算結果と一致する。

PIC シミュレーションの数値計算結果は、電子密度勾配長 L が高調波発生効率に依存すると報告している。筆者は、ダブルパルス励起で電子密度勾配長を制御することにより、高調波生成効率を増加させる方式を提唱する。このダブルパルス励起方式のメリットは、プレパルスとメインパルスの時間差と強度比を調整することで電子密度勾配長 L/λ を制御出来ることである。

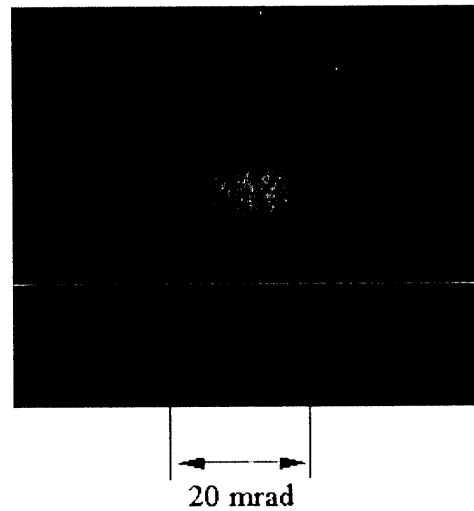


図 1: 3 次高調波の 2 次元空間分布像

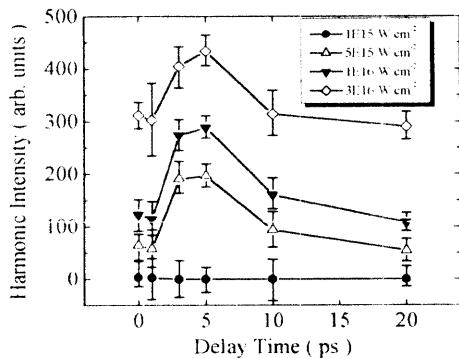


図2: ダブルパルス励起による3次高調波強度

4次高調波強度の増加により、励起レーザーの amplified spontaneous emission (ASE) やベデスタルによって生成されるプレプラズマ中での高調波発生は否定される。それ故、この増加した高調波は急峻な電子密度勾配領域で発生していると考えられる。一方、 I_m/I_p が 0.004 は、0.04 よりも高調波強度の増加が小さい。これは、高調波強度がダブルパルス励起時に形成される電子密度勾配長に依存しているためと考えられる。そこで1次元流体コード HYADES を使い、本実験条件で生成される電子密度勾配長を数値計算した。 I_m/I_p が 0.04 の場合の電子密度分布を図3に示す。ダブルパルスの時間差が大きくなるにつれて電子密度勾配長が徐々に大きくなることが分かった。数値計算結果と本実験結果は非常に良く一致しており、電子密度勾配長が高調波高効率生成に強く依存していることが確かめられた。

第6章では、高次高調波スペクトルのブルーシフトについて述べる。サブピコ秒励起レーザーパルスを用いて、2次、5次高調波のブルーシフトを観測した。 $2 \times 10^{17} \text{ W cm}^{-2}$ の照射強度で2次、5次高調波はそれぞれ、 16 \AA 、 51 \AA ブルーシフトしていることが観測された。2次高調波ブルーシフト観測結果を図4、5に示す。この高調波ブルーシフトは基本波長のドップラーシフト以上に大きいため、プラズマの hydrodynamic motion による原因ではない。また、次数の異なる高調波は波長シフト量も異なるという新たな

メインパルス照射強度 I_m に対するプレパルス照射強度 I_p の比 (I_m/I_p) が 0.04 のときの3次高調波強度の観測結果を図2に示す。ダブルパルス(共にパルス幅 2.2 ps)の時間差が約 5 ps で照射した場合、3次高調波強度は約2~3倍増加することが確認された。ダブルパルスの時間差が 10 ps 以上では、時間差が大きくなるにつれて3次高調波強度は徐々に減少することが分かった。4、5次高調波についても同様に高調波強度の増加が確認された。

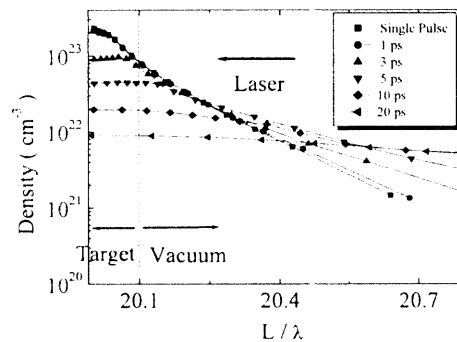


図3: 数値計算による固体界面近傍の電子密度分布

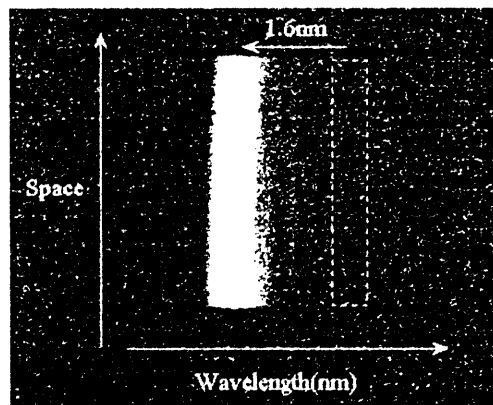


図4: 2次高調波スペクトルのブルーシフト

知見を得た。1次元流体コードHYADESで計算したプラズマ界面の電子温度は800 eV以上であった。それ故、sheathがcollisionless absorptionの状態となっており、ブルーシフトに寄与している。

第7章では、本論文を総括する。

以上、本研究は実験と数値計算により、固体界面プラズマからの高次高調波発生機構が解明され、ピコ秒及びサブピコ秒励起レーザーと高密度プラズマとの非線形相互作用、臨界密度

界面の情報、そして高密度プラズマの動的過程の理解に新たな知見を得た。また、新しい現象としてサブピコ秒励起レーザー照射の場合、高調波スペクトルがcollisionless absorptionにより大きくブルーシフトすることが観測され、固体界面プラズマからの高次高調波が波長可変な光源となる可能性がある。

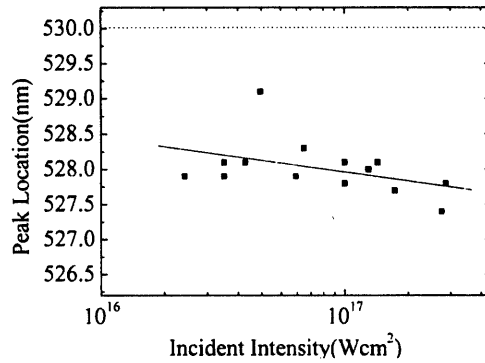


図5: 励起レーザー強度による2次高調波スペクトルのブルーシフト